



プロジェクトメンバー: 電気・電子情報工学系 石川 靖彦 宮坂 泰地 佐藤 真希斗 堤 光輝

Jose A. Piedra-Lorenzana 山根 啓輔

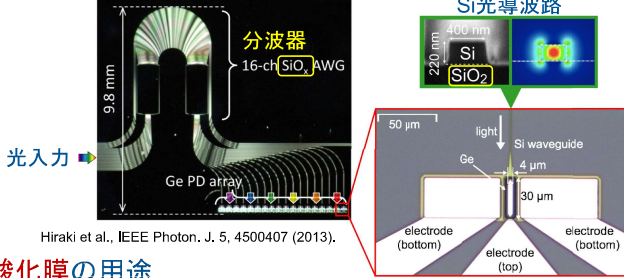


### 1. SiフォトニクスとSi酸化膜の用途

#### ■ Siフォトニクス – Si上への光デバイス集積技術

- 主に光通信応用 – 波長 1.31/1.55 μm (近赤外)
- Si加工技術 – 高精度・生産性

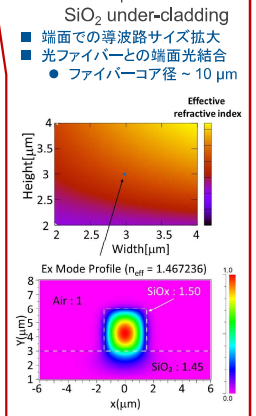
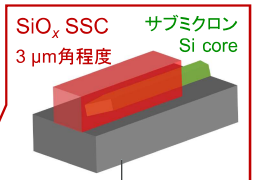
例: 波長多重受信チップ



Hiraki et al., IEEE Photon. J. 5, 4500407 (2013).

#### ■ Si酸化膜の用途

- 光導波路のクラッド – SiO<sub>2</sub>
  - ◆ 屈折率小:  $n_{SiO_2} \sim 1.44$
  - コアへの強い光閉じ込め
  - コア:  $n_{Si} \sim 3.42, n_{SiNx} \sim 2.00$
- 光導波路のコア – SiO<sub>x</sub> (SiリッチSiO<sub>2</sub>)
  - ◆ 屈折率  $n_{SiO_x} \sim 1.50 > n_{SiO_2} \sim 1.44$
  - ◆ 利点
    - 温度変化に堅牢: 合分波器で特に重要
    - 熱光学係数小 (= 屈折率温度依存性小)
    - ポリマーのような経時劣化がない



#### 従来のSSC材料

材料	屈折率	製膜方法	利点	欠点
ポリマー (Polyimide) <sup>1</sup>	1.67	スピンコート	形成容易 段差被覆	吸収損失 経時劣化 (温度・湿度)
SION <sup>2</sup>	1.62	PECVD	劣化耐性	段差被覆 N-H/O-H吸収損?
SiO <sub>x</sub> <sup>3</sup>	1.51	PECVD	劣化耐性	段差被覆 O-H吸収損?

1. G. Roelkens et al., IEEE Photon. Technol. Lett. 17, 2613 (2005).  
 2. Y. Maegami et al., Opt. Express 23, 21287 (2015).  
 3. H. Nishi et al., IEEE photon. J. 7, 4900308 (2015).

### ■ 研究目的

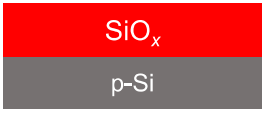
#### TEOS(テトラエトキシシラン)とO<sub>2</sub>を用いたPECVD-SiO<sub>x</sub>

- 期待
  - 劣化耐性に高い、高い段差被覆と低い吸収損 (低残留H)
- 要検討事項
  - ◆ 通信波長での屈折率制御範囲
    - 合分波器・SSC応用では  $n > \sim 1.50$  が望ましい
  - ◆ 屈折率と光吸収の関連有無
    - 系統的に調べられていない
  - ◆ 数μm厚の堆積
    - 膜応力が低い必要がある

### 2. 実験方法

#### ■ 屈折率制御 – Siリッチ化を目指す

- O<sub>2</sub>に対するTEOS供給割合を増加
- 圧力 100 Pa固定
- 温度 350 °C、RFパワー 100 W @ 13.56 MHz, 300 W @ 380 kHz



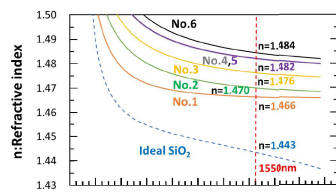
No.	TEOS [sccm]	O <sub>2</sub> [sccm]	He [sccm]	TEOS / O <sub>2</sub>	$n$ 633 nm	$n$ 1550 nm
1	50	750	200	0.07	1.474	1.466
SiO <sub>2</sub> 標準条件						
2	50	250	200	0.20	1.483	1.470
3	50	150	200	0.33	1.490	1.476
4	50	100	200	0.50	1.498	1.482
5	75	100	300	0.75	1.498	1.482
6	95	100	380	0.95	1.502	1.484

### 3. 実験結果と考察

#### (a) 屈折率と消衰・吸収係数 – 分光エリプソメトリ

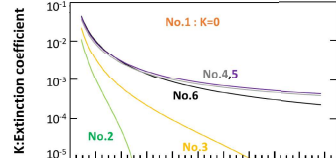
##### ■ 屈折率

- TEOS供給比の増加とともに屈折率上昇
- 最大で  $n = 1.484$  @ 1550 nm
  - ◆ 1.50に至らなかった
  - TEOS供給比の増加が必要
  - ◆ 適用デバイスの明確化 (設計・サイズで要考慮)



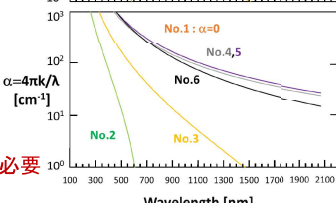
##### ■ 消衰係数

- TEOSの供給比増加とともに消衰係数は上昇傾向



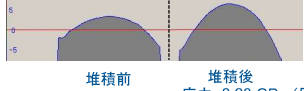
##### ■ 吸収係数

- 消衰係数から計算  $\alpha = 4\pi k / \lambda$
- $n > 1.48$  のサンプル
  - ◆ 進入長 ~ 数100 μm
  - SSCに適用可能レベル
  - 合分波器等への応用には  $\alpha$  の低減必要



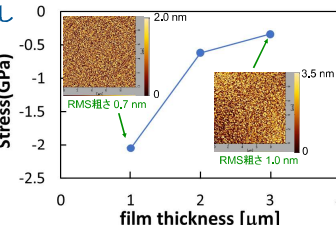
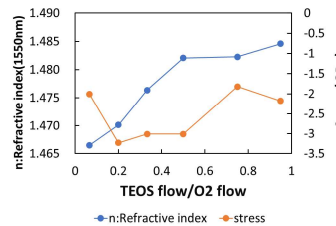
#### (b) 膜応力 – フラットネステスト

測定例: No. 2・膜厚 161 nm



##### ■ 応力

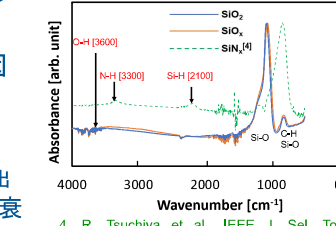
- 圧縮応力
- 膜厚 100 nm程度では 1 GPa台
- ◆ 屈折率・堆積条件に対する依存性なし
- 堆積膜厚増加により応力減少
- 測定例: No. 6・膜厚依存性



#### (c) 赤外吸収特性 – FTIRスペクトル

##### ■ O-H結合:

- 光通信波長帯での損失要因
- No. 1およびNo. 6を測定
- O-H結合は検出限界以下
  - ◆ 比較試料のPECVD-SiNx (原料ガス SiH<sub>4</sub>およびNH<sub>3</sub>)ではN-H結合を検出
- 分光エリプソメトリで検出された消衰係数kは光散乱の可能性もあり

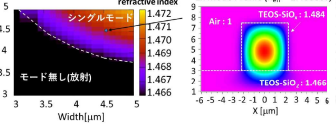


4. R. Tsuchiya et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 28, 4400109 (2022).

#### (d) 得られたTEOS-SiO<sub>x</sub>を利用した光導波路の設計

##### ■ 屈折率の条件

- コア (No. 6):  $n = 1.484$
- クラッド (No. 1):  $n = 1.466$
- 4 μm角程度にコアサイズ拡大
- 光導波路として機能



### 4. まとめ

- 得られたTEOS-SiO<sub>x</sub>は光導波路のクラッドやSSCに適用可
- 合分波器等への応用には光吸収 (散乱) の低減必要

#### 謝辞

■ 分光エリプソメトリによる評価では堀場製作所・和才容子様との協力を得た。感謝致します。

